

引用格式: 田义超, 黄远林, 白晓永, 等. 基于二元逻辑斯蒂模型的桐梓河流域土地利用变化及模拟[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(6): 50-62

Tian Yichao, Huang Yuanlin, Bai Xiaoyong, et al. Land use change and its simulation in Tongzi river basin based on binary logistic model [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(6): 50-62

# 基于二元逻辑斯蒂模型的桐梓河流域 土地利用变化及模拟

田义超<sup>1,2,3,4</sup> 黄远林<sup>1\*</sup> 白晓永<sup>4</sup> 张强<sup>1</sup> 陶进<sup>1</sup> 张亚丽<sup>1</sup> 谢小魁<sup>1</sup> 王日明<sup>1</sup>

(北部湾大学资源与环境学院<sup>1</sup>, 海洋地理信息资源开发利用重点实验室<sup>2</sup>, 广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室<sup>3</sup>, 钦州 535000; 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室<sup>4</sup>, 贵阳 550002)

**摘要** 为探明典型喀斯特流域土地利用时空变化过程, 揭示流域土地利用变化主控因素, 以桐梓河流域 1980、1990、2000、2010、2015 年五期的遥感影像解译数据以及研究区的自然社会经济等数据为基础, 综合运用土地利用转移概率矩阵以及二元逻辑斯蒂回归模型对流域的土地利用格局进行了最佳模拟尺度选择, 在此基础上构建了流域不同土地利用类型空间分布概率图。研究表明: 桐梓河流域的景观类型异质性较强, 土地利用类型在研究期间内转移过程比较复杂, 各种土地类型流转中“转出与转入”现象普遍存在; 桐梓河流域土地利用分析及其模拟的最佳空间模拟尺度为 120 m × 120 m; 喀斯特流域林地与灌木林地的发生概率与降水量的大小并没有直接关系, 降水量越大的地方流域林地分布概率不一定越高, 其发生概率一般与气温正相关, 温度越高, 林地和灌木林地的出现概率越大; 喀斯特流域草地的分布与岩性有极大的关系, 草地发生概率一般出现在喀斯特地区以及降水量高的地区, 而气温越高的地区草地出现的概率越低; 从逐点对比的精度来看, 建设用地的模拟准确率最高(89.62%), 水体次之(86.15%), 而草地的模拟准确率最低, 仅为 62.68%。由此可见在对喀斯特流域土地利用时空数据变化及其驱动力识别时, 二元逻辑斯蒂回归模型具有很好的模拟能力。

**关键词** 土地利用 二元逻辑斯蒂 空间模拟 典型喀斯特 桐梓河流域

中图分类号 P962; 文献标志码 A

人类对土地利用方式的改变对土地覆被变化产生影响, 改变陆表蒸发、截留、填洼及下渗等生态水文过程导致区域或流域的产汇流以及产沙过程发生变化, 从而影响到以陆表土地利用为下垫面的流域水文循环与水资源循环和交互过程<sup>[1]</sup>, 由此引发的相关生态环境问题已对区域/流域生态以及社会经济发展等多方面产生了深远的影响<sup>[2-4]</sup>。国际地圈生物圈计划(international geosphere-biosphere program, IGBP) 和国际全球环境变化人文因素计划(international human dimensions programme on global

environmental change, IHDP) 在 1995 年将土地利用变化研究作为一个重要的研究项目提出, 此后众多科学家和研究机构分别在全球或区域尺度上开展了土地利用和土地利用覆被变化的遥感监测、分类、驱动机理、土地利用模拟等方面的研究工作<sup>[5-7]</sup>。土地覆被变化问题不仅涉及区域生态问题, 同时也涉及政府对环境发展所制定的相关政策, 如水土保持问题、人口扩张、退耕还林政策制定、石漠化治理工程、生态补偿政策, 甚至涉及区域经济发展以及经济安全问题, 因此, 定量研究土地利用变化及其模拟成为当今生态环境科学研究的热点问题之一<sup>[8]</sup>。

土地利用变化与模拟模型是土地利用动态分析和国家政策制定以及土地利用管理的有效工具。一方面, 他们可以更好地解决影响土地利用变化中的社会经济以及规划因素。另一方面, 这些模型有助于探索在不同情景下的未来土地利用变化<sup>[9]</sup>。基于经验统计方法的 CLUE-S (conversion of land use and its effects at small regional extent) 模型<sup>[10]</sup>、基于多智能主体分析方法的 ABM (agent based modeling) 模型、基于栅格邻域关系分析方法的 CA (cellular automata) 模型、基于土地系统结构变化及空间格

2018 年 7 月 26 日收到 国家重点研发计划(2016YFC0502300)、广西自然科学基金联合培育项目(2018JJA150135)、广西教育厅基金(ZD2014138)、广西创新驱动发展专项基金(2018AA13005)、广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室项目(2015ZB07)、广西“海洋生态环境”院士工作站能力建设项目(AD17129046)和广西本科高校特色专业及实验实训教学基地建设项目(桂教高教(2018)52号)资助

第一作者简介: 田义超(1986—)男, 汉族, 陕西西安人, 博士, 讲师。E-mail: tianyichao1314@yeah.net。

\* 通信作者简介: 黄远林(1971—)男, 苗族, 湖南龙山人, 博士, 副教授。E-mail: huangyuanlin@yeah.net。

局演替综合分析的 DLS( dynamics of land system) 模型都可以用来模拟区域土地利用变化的时空动态格局<sup>[11,12]</sup>。与其他模型相比,二元逻辑斯蒂(binary logistic) 回归模型可以在区域土地利用和土地覆被动态变化的基础上对土地利用变化与其社会、经济、技术、政策、自然环境等驱动因子相互关系进行定量化分析,综合不同时空尺度区域土地利用覆被变化过程和驱动力研究,为土地利用决策和土地利用规划提供更加科学的依据。但是,已有的研究成果多是对非喀斯特地区的土地利用格局和过程进行模拟<sup>[13-15]</sup>。喀斯特地区土地利用景观格局与非喀斯特地区有显著差异,且其驱动力机制与非喀斯特地区有显著的差异。由于受到喀斯特地区地质地貌异质性特征的影响,土地利用景观格局呈现出破碎化特征,如何定量揭示喀斯特地区或流域土地利用格局的尺度效应与驱动机制成为喀斯特地区生态及水文研究关注的前沿和热点内容。

桐梓河流域位于大娄山脉西缘,河流呈东向西,是赤水河流域最大支流,属于典型的喀斯特流域。近年来陡坡开荒、乱砍滥伐导致区域水土流失加重,流域的景观格局发生了显著的变化,直接影响着流域的生态系统服务以及生态水文过程,但是目前来说针对该流域的土地利用变化及其驱动力机制尚不明晰,制约流域土地利用变化的关键驱动力因子目前尚未有学者进行定量化研究。鉴于此,本研究基于分类与回归树(classification and regression trees, CART) 方法<sup>[16]</sup>对桐梓河流域 1980、1990、2000、2010、2015 年五期的遥感影像进行解译,基于研究区的自然和社会经济数据,借助土地利用转移概率矩阵及 binary logistic 回归模型对流域的土地利

用格局进行最佳模拟尺度选择,同时对土地利用变化的驱动力因素进行定量分析,以期为典型喀斯特流域土地利用变化、土地利用模拟以及驱动力机制的定量化研究提供理论和方法的借鉴。

### 1 研究区概况

桐梓河流域,古名溱溪水,亦名牛渡河,是赤水河最大的支流(图 1)。流域面积 3 348 km<sup>2</sup>,发源于桐梓楠牛石大火土,上源称天门河,西北流转西南流,经天门洞、蟠龙洞两段伏流,至混子河口折西流,至观音寺河口折西北流,至石嘴折西流,至两河口注入赤水河。观音寺河口至石嘴段为仁怀、桐梓界河,石嘴至两河口段为仁怀、习水界河。流域气候类型属中亚热带季风性湿润气候,气候垂直变化明显,温和且湿润,雨量较丰沛,降水分布不均。冷暖气流常被海拔高的山脉阻挡,局部地区形成强对流天气。多年平均气温 17.7 ℃,极端最高气温 39.9 ℃,极端最低气温 -2.7 ℃,平均全年积温 5 392 ℃。桐梓河属于典型的雨源型山区河流,径流的时空分布变化与降水基本一致,上游桐梓水文站多年平均径流深 563 mm,下游二郎坝水文站径流深 503 mm,从上游到下游的递减趋势比较明显。径流年际变化较大,年内分配不均匀。在年内分配上,虽然汛期径流总量大,但其分配很不均匀,汛中有枯。

### 2 数据来源与研究方法

#### 2.1 数据来源与预处理

研究所使用的数据主要分为两类,第一类为遥感数据,第二类为非遥感数据。其中遥感数据是通过美国地质勘探局官方网站(<http://glovis.usgs>).

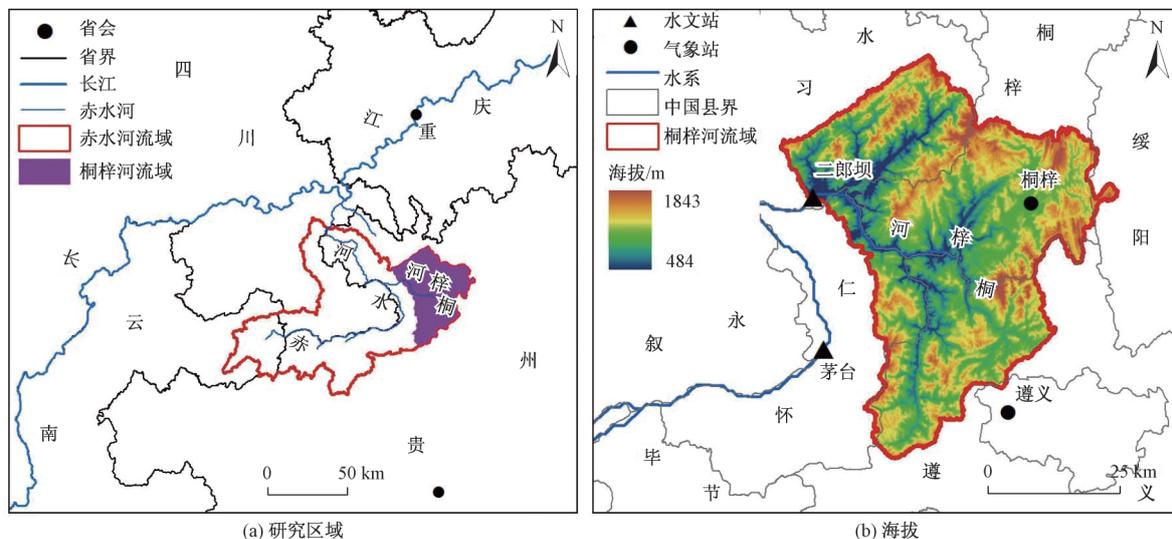


图 1 桐梓河流域地理位置  
Fig. 1 Location of Tongzi river basin

gov/) 上下载并获取的,影像的时间为 1980、1990、2000、2010 及 2015 年共五期遥感影像,其中 1980 年的遥感数据来源于 Landsat 卫星的 Landsat MSS 传感器数据,而 2015 年的遥感数据则来源于最新的传感器 Landsat8 OLI 传感器数据,其他年份的遥感影像为 Landsat5 和 Landsat7 系列。利用 ENVI5.3 对典型喀斯特流域的遥感影像进行几何纠正、大气校正、拼接和裁剪等预处理操作,基于 CART 方法<sup>[16]</sup>对遥感数据进行解译,采用《第二次全国土地调查技术规程》的景观分类系统和分类标准,将典型流域的土地利用划分为水体、建设用地、林地、灌木林地、耕地和草地(图 2)。非遥感数据主要包括各个地区不同县市的地理志、电子图件材料、岩性类型、土壤类型、植被类型其他各类统计报表、社会经济数据及野外实地勘测资料。其中地理志来源于贵州省图书馆,图件材料中的行政区划图以及交通图件全部为纸质版,将其收集到之后对其进行电子扫描,校正之后利用 GIS 软件进行数字化,而水系数据来源于贵州省水文水资源局,岩性数据来源于中科院地化所环境地球化学国家重点实验室。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 土地利用转移概率矩阵

不同土地利用类型的时空动态变化过程可以通过土地利用类型的马尔科夫转移矩阵来定量表征,这种转移矩阵可以很清楚地描述不同土地利用类型在两个时期的转变过程<sup>[17]</sup>。通过 GIS 的叠置分析操作可以快速得出研究区不同时期的土地利用的空间转移数量以及不同地类之间的转移过程和趋势,转移矩阵的数学形式为<sup>[17]</sup>

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1n} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ U_{n1} & U_{n2} & \dots & U_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中:  $U$  为流域内土地利用总面积;  $n$  为不同土地利用类型的个数;  $i, j$  表示研究初期和末期不同的土地利用类型,  $U_{ij}$  为  $k$  时期第  $i$  种土地利用类型转变为  $k+1$  时期第  $j$  种土地利用类型的面积总量变化。

### 2.2.2 binary logistic 回归模型

在对典型喀斯特流域桐梓河流域土地利用进行

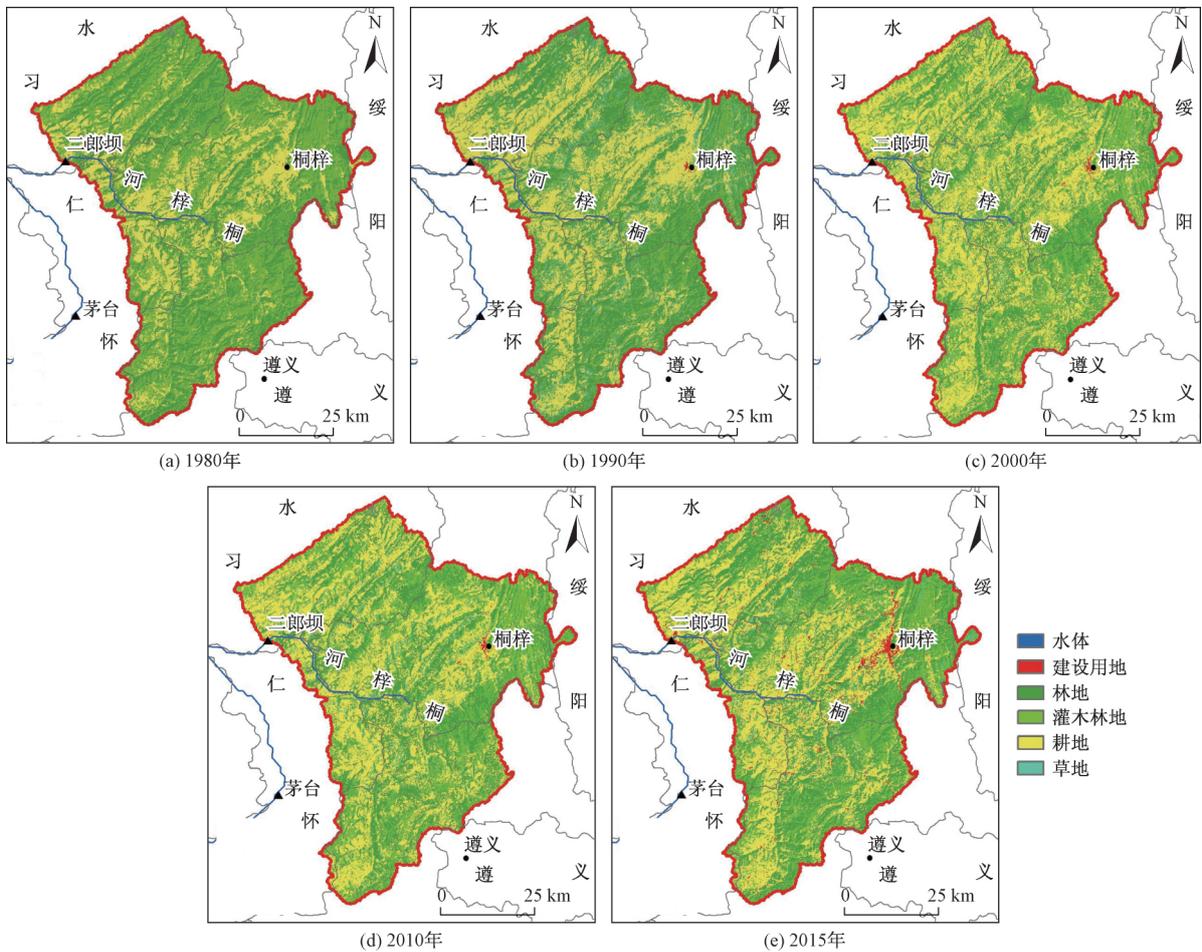


图 2 研究区不同时期土地利用类型空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use types in different periods in the study area

驱动因素分析、尺度模拟和尺度选择时所选用的方法是 binary logistic 回归方程。该回归方程认为每一种土地利用类型的栅格图像都可以通过技术方法离散成为 0 和 1  $\rho$  表示这种土地利用类型在研究区域内不出现, 而 1 值表示这种土地利用类型在研究区域内出现。binary logistic 回归方程中的解释变量称为自变量, 这种自变量可以是温度、降水及地形地貌等影响土地利用变化的自然因素, 也可以是 GDP、人口以及工业生产总产值等社会经济变量。

土地利用类型的概率图像的表达式可以表征为

$$p = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m)} \quad (2)$$

式(2)中:  $p$  代表出现该种土地利用类型的概率;  $x$  为自变量或者解释变量;  $\beta_0$  为常数项  $\beta_m$  为逻辑斯蒂回归方程的回归系数。对回归方程的检验解释情况可以用 ROC (relative operating characteristics) 曲线<sup>[18]</sup>进行检验。

对  $p$  进行对数变换, 可以将 logistic 回归方程表示成线性形式:

$$\lg \frac{p}{1-p} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m \quad (3)$$

### 2.2.3 土地利用驱动因子选择

土地利用时空差异性主要受到自然因素、经济因素及社会因素的综合影响, 不同土地利用类型状态的变化以及转移的时空格局都是由自然因素及社会经济因素共同作用的结果。在对桐梓河流域土地利用影响因素进行选取的时主要遵循以下原则: ①因子的可获得性; ②所选驱动因子可以量化表达; ③驱动因子能够代表研究区土地利用变化的实际情况。此外研究也按照喀斯特地区的特点选取了喀斯特地质地貌背景作为影响土地利用变化的驱动力因子, 具体指标体系及其含义如表 1 所示。

## 3 结果与分析

### 3.1 桐梓河流域土地利用数量分析

在 ArcMap10.2 中, 通过对桐梓河流域 1980、1990、2000、2010、2015 年五期土地利用类型面积数据进行统计, 可以得出典型流域土地利用数量在 35 年的总体变化趋势和变化过程(表 2), 由表 2 可知, 由于受到喀斯特异质性景观格局的影响, 桐梓河流域各种土地利用类型面积在过去的 35 年中变化显著。研究期内, 流域耕地面积变化的趋势经历了两个大的阶段, 其中 1980~2000 年耕地的面积呈现出急剧上升阶段, 面积由 1980 年 860.29 km<sup>2</sup> 增加到 2010 年的 1 498.99 km<sup>2</sup>, 而 2000~2015 年期间流

表 1 桐梓河流域土地利用变化驱动因子  
Table 1 Driving factors of land use change in Tongzi river basin

| 变量       | 驱动因子        | 驱动因子描述                    |
|----------|-------------|---------------------------|
| $X_1$    | 坡度          | 数字高程模型 DEM 在 GIS 中衍生出来的数据 |
| $X_2$    | 土壤有机质       | 对土壤肥力的描述                  |
| $X_3$    | 离铁路站点的距离    | 量算每一颗像元到铁路站点中心的距离         |
| $X_4$    | 高程 DEM      | 采用黄海高程面生成的数据, 来源地理空间数据云   |
| $X_5$    | 灯光指数 DSMP   | 表征城市发展状况以及经济发展程度的指标       |
| $X_6$    | 离居民点中心的距离   | 量算每一颗像元到居民点中心的距离          |
| $X_7$    | 离喀斯特岩性中心的距离 | 表征区域喀斯特覆盖程度的指标            |
| $X_8$    | 人口数量        | 单位: 人                     |
| $X_9$    | 降水量         | 云南、四川以及贵州气象站点插值           |
| $X_{10}$ | 离水系中心的距离    | 量算每一颗像元到水系中心的距离           |
| $X_{11}$ | 离道路中心的距离    | 量算每一颗像元到道路中心的距离           |
| $X_{12}$ | 离城镇中心的距离    | 量算每一颗像元到城镇中心的距离           |
| $X_{13}$ | 气温          | 云南、四川以及贵州气象站点插值           |
| $X_{14}$ | GDP 总量      | 国内生产总值(元)                 |

域的耕地面积呈现出急剧下降趋势, 由 2010 年的 1 498.99 km<sup>2</sup> 下降到 2015 年的 1 295.36 km<sup>2</sup>, 研究期末 2015 年耕地的面积相对于 1980 年保持增长趋势。而研究期内流域有林地的面积则经历了三个阶段, 其中 1980~1990 年有林地面积显著上升, 由 1980 年的 1 170.16 km<sup>2</sup> 上升到 1990 年的 1 221.60 km<sup>2</sup>, 之后有林地面积呈现减少趋势, 自 2000 年之后由于实施了退耕还林及石漠化工程, 有林地面积大幅度上升, 由 1990 年的 1 221.60 km<sup>2</sup> 增加到 1 206.18 km<sup>2</sup>, 有林地的面积经过历史时期的演变几乎与 1980 年的有林地面积持平。灌木林地也在研究期内也呈现出急剧下降阶段, 其转折的阈值点出现在 1990 年, 1990 年以前流域的灌木林地呈现下降趋势, 由 1980 年的 1 129.29 km<sup>2</sup> 下降到 392.31 km<sup>2</sup>, 达到历史时期的最低值, 1990 年后呈现波动上升趋势, 由 1990 年的 392.31 km<sup>2</sup> 上升到 2010 年的 480.81 km<sup>2</sup>, 之后呈现略微下降趋势, 总的来说, 灌木林地自 1990 年之后上升幅度减慢。桐梓河流域草地的面积同样经历了两个大的阶段, 其转折的阈值点发生在 1990 年。对于建设用地来说, 近 35 年来建设用地也一直呈现出剧烈上升趋势。

### 3.2 桐梓河流域土地利用空间变化特征

从桐梓河流域 1980~2015 年的面积转移矩阵表 3 和图 2 中可知, 桐梓河流域的景观类型异质性较强, 土地利用类型在研究期间内转移过程比较复杂, 各种土地利用类型流转中“转出与转入”现象普遍存

表 2 桐梓河流域不同年份土地利用类型变化  
Table 2 Changes of land use types in different years in Tongzi river basin

| 土地利用类型 | 1980 年             |       | 1990 年             |       | 2000 年             |       | 2010 年             |       | 2015 年             |       |
|--------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
|        | 面积/km <sup>2</sup> | 比例/%  |
| 水体     | 0.47               | 0.01  | 1.38               | 0.04  | 8.15               | 0.26  | 6.79               | 0.21  | 11.38              | 0.36  |
| 建设用地   | 0.26               | 0.01  | 2.80               | 0.09  | 7.80               | 0.25  | 6.07               | 0.19  | 54.84              | 1.72  |
| 有林地    | 1 170.16           | 36.76 | 1 221.60           | 38.38 | 1 059.09           | 33.27 | 1 115.80           | 35.05 | 1 206.18           | 37.89 |
| 灌木林地   | 1 129.29           | 35.48 | 392.31             | 12.32 | 406.50             | 12.77 | 480.81             | 15.10 | 427.42             | 13.43 |
| 耕地     | 860.29             | 27.03 | 1 219.89           | 38.32 | 1 498.99           | 47.09 | 1 395.98           | 43.86 | 1 295.36           | 40.70 |
| 草地     | 22.62              | 0.71  | 345.12             | 10.84 | 202.56             | 6.36  | 177.65             | 5.58  | 187.91             | 5.90  |
| 合计     | 3 183.09           | 100   | 3 183.09           | 100   | 3 183.09           | 100   | 3 183.09           | 100   | 3 183.09           | 100   |

表 3 桐梓河流域 1980~2015 年流域土地利用转移矩阵  
Table 3 Land use transfer matrix from 1980 to 2015 in Tongzi river basin

| 土地利用类型 | 面积/km <sup>2</sup> |          |          |       |          |       |
|--------|--------------------|----------|----------|-------|----------|-------|
|        | 草地                 | 耕地       | 灌木林地     | 建设用地  | 林地       | 水体    |
| 草地     | 11.84              | 118.91   | 6.01     | 1.36  | 19.09    | 0.57  |
| 耕地     | 229.24             | 2 829.11 | 95.70    | 26.92 | 296.28   | 20.29 |
| 灌木林地   | 472.53             | 3 052.48 | 1 135.78 | 9.90  | 1 401.26 | 3.12  |
| 建设用地   | 0.42               | 3.25     | 0.12     | 0.71  | 1.12     | 1.17  |
| 林地     | 486.50             | 2 291.05 | 489.64   | 7.97  | 3 449.76 | 11.58 |
| 水体     | 0.06               | 1.20     | 0.01     | 0.03  | 0.04     | 3.35  |



图 2 研究区 1980~2015 年土地利用转移矩阵空间分布  
Fig. 2 Spatial distribution of land use transfer matrix from 1980 to 2015 in study area

在。其中草地面积主要由林地、灌木林地和耕地转换而来,主要流向林地和灌木林地;耕地主要由灌木林地和林地转换而来,主要流向草地、林地和建设用地;

灌木林地则主要由林地转换而来,主要流向耕地。

### 3.3 桐梓河流域土地利用驱动力分析

#### 3.3.1 桐梓河流域土地利用尺度选择结果

通过对十个尺度上的驱动力因子栅格图像与流域各种土地利用类型栅格图像进行 binary logistic 回归,可得出十个尺度的逻辑斯蒂回归方程结果,之后对每一个结果在 SPSS 19.0 中进行 ROC (relative operating characteristics) 检验,可以得到研究区 10 种尺度下的 ROC 统计结果值,图 3 为典型流域的耕地、灌木林地以及草地在十种空间尺度上的 ROC 曲线图。由图 3 可知,不同地类 ROC 的值在不同空间尺度上呈现出一定的规律性,即随着尺度的增加,ROC 的值呈现出先增加后减少的趋势,且不同土地利用类型 ROC 的值表现出的尺度效应不一致。从典型喀斯特流域 ROC 曲线的分布图中可知,在空间尺度为 120 m 的范围内,ROC 的值在耕地、灌木林地以及草地这三个地类均达到了最大值,分别为 0.85、0.79 和 0.92,说明在 10 种不同尺度的转换效应下,120 m × 120 m 是桐梓河流域进行土地利用分析以及土地利用模拟时的最佳空间模拟尺度。

#### 3.3.2 binary logistic 回归及其驱动力分析

在进行空间逻辑斯蒂回归分析时,首先将研究区的不同土地利用类型离散成二值图,即出现的地类赋值 1,如果不是此地类则赋值 0。在 Arc-Map10.2 中实现时,首先将属性表中是耕地、灌木林地、草地、林地、建设用地和水体的地类全部赋值 1,

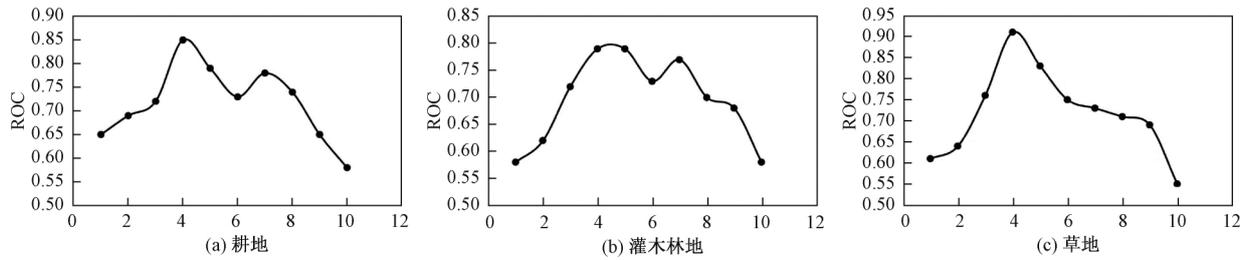


图 3 研究区耕地、灌木林地和草地 ROC 模拟曲线

Fig. 3 ROC simulation curves of cultivated land , shrub land and grassland in study area

而非此种地类则赋值为 0 ,最后对各种土地利用类型图进行栅格化处理 ,可得到了研究区的二值土地利用类型图。而对于驱动因子的处理 ,首先是对驱动因子数据进行栅格化 ,然后对研究区的各个土地利用类型和驱动因子分别进行抽样 ,抽样的过程是借助于 ArcGIS10.2 Toolbox 中的 create random points 和 reclass 重采样工具完成。

在对桐梓河流域土地利用变化与驱动因子进行 binary logistic 回归方程建立的过程中 ,由 3.3.1 节的尺度选择结果可知 ,桐梓河流域在进行土地

利用模拟与格局优化时 ,特征选择尺度是 120 m × 120 m ,因此在此尺度下构建了典型流域桐梓河流域的 binary logistic 回归方程。通过对土地利用数据以及影响桐梓河流域的驱动力因子进行 20% 的采样 ,运用 SPSS 19.0 软件进行二元逻辑斯蒂回归分析 ,得出了研究区不同土地利用类型的常数项及各个回归系数的贡献率 ,之后对回归分析的预测结果进行了 ROC 值验证 ,可得出桐梓河流域各种土地利用类型的统计特征值及统计量如表 4 所示。

表 4 桐梓河流域土地利用驱动力逻辑回归分析结果

Table 4 The results of binary logistic in different land use in Tongzi river basin

| 土地类型 | 参数       | 回归方程系数 $\beta/10^{-3}$ | SE/ $10^{-3}$ | Wald 统计量 | 自由度 | 拟合优度检验/ $10^{-3}$ | 发生比率 B   |
|------|----------|------------------------|---------------|----------|-----|-------------------|----------|
| 水体   | $X_1$    | -96.19                 | 14.6          | 7.94     | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_4$    | -7.64                  | 0.65          | 85.54    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_6$    | 0.47                   | 0.24          | 3.43     | 1   | 49.68             | 1.07     |
|      | $X_7$    | -1.1                   | 0.29          | 41.58    | 1   | 0.13              | 1        |
|      | $X_{10}$ | 0.83                   | 0.37          | 23.97    | 1   | 23.45             | 1.01     |
|      | 常量       | 1 778.32               | 501.24        | 21.04    | 1   | 0.39              | 1        |
| 建设用地 | $X_1$    | -68.89                 | 14.8          | 8.31     | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_2$    | -115.31                | 44.98         | 142.96   | 1   | 10.36             | 0.85     |
|      | $X_3$    | 0.18                   | 0.06          | 10.57    | 1   | 2.42              | 0.38     |
|      | $X_4$    | -3.74                  | 0.63          | 25.12    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_5$    | 231.38                 | 40.84         | 20.9     | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_6$    | 0.76                   | 0.26          | 92.13    | 1   | 4.01              | 1.27     |
|      | $X_7$    | -0.6                   | 0.24          | 17.76    | 1   | 14.53             | 1        |
|      | $X_{11}$ | 1.67                   | 0.4           | 3.05     | 1   | 0.03              | 1        |
|      | $X_{12}$ | 0.2                    | 0.06          | 0.97     | 1   | 0.46              | 129.87   |
|      | $X_{14}$ | 0.17                   | 0.06          | 94.92    | 1   | 1.49              | 1        |
|      | 常量       | -21.64                 | 791.93        | 22.95    | 1   | 978.2             | 1        |
| 林地   | $X_1$    | 39.88                  | 1.29          | 28.84    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_2$    | -10.2                  | 4             | 87.53    | 1   | 10.87             | 0.92     |
|      | $X_3$    | -0.06                  | 0.01          | 9.74     | 1   | 0                 | 1.1      |
|      | $X_5$    | -67.55                 | 20.2          | 2.12     | 1   | 0.83              | 5 737.56 |
|      | $X_6$    | -0.15                  | 0.02          | 21.05    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_8$    | -1.53                  | 0.06          | 728.27   | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_9$    | -3.54                  | 0.56          | 50.58    | 1   | 0                 | 0.9      |
|      | $X_{10}$ | -0.14                  | 0.02          | 11.85    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_{11}$ | -0.13                  | 0.02          | 107.09   | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_{13}$ | 390.11                 | 30.9          | 905.7    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_{14}$ | -0.21                  | 0.08          | 17.7     | 1   | 11.74             | 1        |
|      | 常量       | -1 540.82              | 530.46        | 134.48   | 1   | 3.68              | 1        |

续表 4

| 土地类型 | 参数       | 回归方程系数 $\beta/10^{-3}$ | SE/ $10^{-3}$ | Wald 统计量 | 自由度 | 拟合优度检验/ $10^{-3}$ | 发生比率 $B$ |
|------|----------|------------------------|---------------|----------|-----|-------------------|----------|
| 灌木林地 | $X_1$    | 32.23                  | 1.88          | 187.41   | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_2$    | 20.42                  | 6.19          | 119.82   | 1   | 0.96              | 1        |
|      | $X_3$    | -0.03                  | 0             | 922.53   | 1   | 0                 | 1.04     |
|      | $X_4$    | 3.94                   | 0.09          | 13.63    | 1   | 0                 | 1.02     |
|      | $X_5$    | -99.65                 | 28.42         | 10.83    | 1   | 0.45              | 0.81     |
|      | $X_6$    | -0.12                  | 0.03          | 14.25    | 1   | 0.31              | 65.92    |
|      | $X_7$    | 0.2                    | 0.05          | 8.79     | 1   | 0.12              | 1        |
|      | $X_8$    | -2.68                  | 0.12          | 6.86     | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_9$    | -3.61                  | 0.67          | 603.4    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_{10}$ | -0.11                  | 0.03          | 13.41    | 1   | 0.12              | 0.83     |
|      | $X_{11}$ | -0.11                  | 0.03          | 6.9      | 1   | 0.16              | 1        |
|      | $X_{13}$ | 232.72                 | 40.08         | 24.64    | 1   | 0                 | 1        |
|      | 常量       | -15 725.51             | 672.28        | 356.83   | 1   | 0                 | 1        |
| 耕地   | $X_1$    | -47.14                 | 1.3           | 5.25     | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_2$    | 20.02                  | 3.83          | 14.13    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_3$    | -0.02                  | 0.01          | 128.06   | 1   | 1.09              | 1.03     |
|      | $X_4$    | -1.54                  | 0.06          | 226.66   | 1   | 0                 | 0        |
|      | $X_6$    | -0.32                  | 0.02          | 35.35    | 1   | 0                 | 1.06     |
|      | $X_7$    | -0.2                   | 0.03          | 97.65    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_8$    | 0.51                   | 0.05          | 78.72    | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_9$    | -4.72                  | 0.58          | 275.01   | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_{10}$ | 0                      | 0             | 276.28   | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_{11}$ | 0                      | 0             | 285.59   | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_{13}$ | -154                   | 31            | 160.18   | 1   | 0                 | 1        |
|      | $X_{12}$ | -0.03                  | 0             | 145.21   | 1   | 0                 | 7.08     |
|      | $X_{14}$ | -0.38                  | 0.06          | 899.37   | 1   | 0                 | 1        |
|      | 常量       | 10 838                 | 545           | 239.63   | 1   | 0                 | 1        |
| 草地   | $X_1$    | -25.03                 | 2.5           | 791.04   | 1   | 0                 | 0.97     |
|      | $X_2$    | -17.47                 | 7.39          | 6.5      | 1   | 18.1              | 0.99     |
|      | $X_4$    | -0.64                  | 0.09          | 36.66    | 1   | 0                 | 0.27     |
|      | $X_5$    | -119.81                | 35.27         | 144.4    | 1   | 0.68              | 1        |
|      | $X_6$    | -0.15                  | 0.05          | 150.5    | 1   | 1.04              | 1        |
|      | $X_7$    | 0.15                   | 0.05          | 127.13   | 1   | 2.32              | 1        |
|      | $X_8$    | -0.09                  | 0.03          | 50.35    | 1   | 2.34              | 0.85     |
|      | $X_9$    | 0.72                   | 0.36          | 4.74     | 1   | 44.8              | 1        |
|      | $X_{13}$ | -208.7                 | 42.7          | 34.42    | 1   | 0                 | 1        |
|      | 常量       | 1 071.82               | 497.37        | 4.6      | 1   | 31.17             | 1        |

注: SE 为标准差;  $X_1 \sim X_{14}$  为驱动因子。

### (1) 水体

影响桐梓河流域水体的驱动力因子共有 4 个。这 4 个驱动力因子分别为坡度、高程 DEM 与离居民点中心的距离、与喀斯特岩性中心的距离及距离水系中心的距离。其中坡度、高程 DEM 以及离喀斯特岩性中心的距离与距离水系中心的相关系数  $\beta$  为负数,说明坡度越陡峭、高程越高以及距离喀斯特中心越远,该区域的水体越发达,这也是符合自然规律的,表明水域主要分布于地势较低的地带。而距离居民点中心、距离水系中心的距离与桐梓河流域水体地类的相关系数为正,说明在桐梓河流域这个典型的喀斯特地区居民点以及乡村聚落主要分布于水体或者河流附近。

### (2) 建设用地

影响桐梓河流域建设用地的 10 个驱动力因子

分别为坡度、土壤有机质含量、离铁路站点中心的距离、离城镇中心的距离、高程 DEM、灯光指数 DSMP、GDP 总量、离居民点中心的距离、离喀斯特岩性中心的距离及离道路中心的距离。其中离铁路站点中心的距离、灯光指数 DSMP、流域的 GDP 总量、离居民点的距离以及离道路中心的距离与建设用地的相关系数  $\beta$  为正数,表征流域建设用地的扩展与这几个驱动因素有着显著的相关性,从相关系数大小来说,灯光指数 DSMP、离居民点的距离以及离道路中心的距离对建设用地的相关系数较高,说明灯光指数 DSMP 越大,离道路及居民点中心的距离越近,建设用地的出现概率越高。另外,流域中 GDP 总量及离铁路站点中心的驱动力因子也进入了回归方程,说明建设用地的发生不仅与区域的经济总量有关,还受到流域的交通便利程度的影响。而桐梓河流域

中的坡度、土壤有机质、高程 DEM、离喀斯特岩性中心的距离与流域中的建设用地之间的相关系数为负数,说明桐梓河流域的建设用地也主要分布于地势比较平坦的坝地、丘陵谷地或者河谷地区,而非地势较大、坡度较陡的山地地区,这也造成了建设用地与耕地之间的供需矛盾日益突出,导致建设用地与耕地争地的现象频繁发生。

### (3) 林地

影响桐梓河流域有林地分布的 12 个驱动力因子分别为坡度、土壤有机质、离铁路站点的距离、离城镇中心的距离、灯光指数 DSMP、GDP 总量、离居民点中心的距离、人口数量、降水量、离水系中心的距离、离道路中心的距离以及气温。其中流域的土壤有机质、离铁路站点中心的距离、离城镇中心的距离、灯光指数 DSMP、GDP 总量、离居民点中心的距离、人口数量、降水量及离河流中心的距离与林地地类的相关系数  $\beta$  值为负数,说明流域有林地的空间分布与这几个驱动因素显著负相关性。从相关系数大小来说,灯光指数 DSMP、流域的土壤有机质及流域的降水量与林地地类的负相关系数较大,分别为  $-0.067\ 545$ 、 $-0.010\ 196$  和  $-0.003\ 535$ ,说明在研究区内灯光指数越小、流域的土壤有机质越小,林地的分布概率越高,而桐梓河流域的林地分布与降水量也呈现出负相关关系,这也表明在喀斯特地区林地的出现概率并与降水量的大小有直接关系,降水量越大的地方流域的林地分布概率也不一定越高。而流域中的坡度、气温与林地的分布显著正相关,其中林地的分布与气温的相关系数绝对值在林地的驱动力影响因子中达到最大值,其值为  $0.390\ 106$ ,说明在桐梓河流域的林地地类的发生概率一般与气温正相关,温度越高,林地的出现概率也就越大,而研究区内坡度对于林地地类的影响正相关关系,这也符合自然规律,即在喀斯特地区林地一般分布于坡度较陡、海拔较高的地方。

### (4) 灌木林地

影响桐梓河流域灌木林地分布的 12 个驱动力因子分别为坡度、土壤有机质、离铁路站点的距离、高程 DEM、灯光指数 DSMP、离居民点的距离、离喀斯特中心的距离、人口数量、降水量、离水系的距离、离道路的距离以及气温。其中离铁路站点的距离、灯光指数 DSMP、离居民点的距离、降水量以及离道路中心的距离与林地地类的相关系数  $\beta$  值为负数,说明流域灌木林地的空间分布与这几个驱动因素显著负相关。从相关系数大小来说,灯光指数 DSMP 和降水量与灌木林地的负相关系数相对较大,分别为  $0.099\ 651$  和  $-0.003\ 608$ ,说明在研究区内灯光

指数越小灌木林地的分布概率越高,即流域的灯光指数是流域城镇发展空间的反映,灌木林地也一般远离于城市建设用地分布。而桐梓河流域的灌木林地分布与降水量负相关,这也表明在喀斯特地区灌木林地的出现概率并不与降水量的大小有直接关系,降水量越大的地方的灌木林地分布概率不一定越高。桐梓河流域中的坡度、土壤有机质、高程 DEM、离喀斯特岩性中心的距离以及气温与灌木林地的分布显著正相关,说明灌木林地一般分布在坡度较陡及海拔较高的山地地区,而桐梓河流域中气温、土壤有机质及离喀斯特地区的距离与灌木林地的正相关系数分别为  $0.232\ 719$ 、 $0.020\ 42$  和  $0.000\ 204$ 。从这几个正相关系数中可以检测出喀斯特岩性中心距离的这个驱动力因子也出现在回归方程中,说明桐梓河流域的灌木林地在喀斯特地区出现的概率也较高,而灌木林地的分布与温度的相关系数绝对值在灌木林地的驱动力影响因子中达到最大值,说明在桐梓河流域灌木林地与林地地类相似,其发生概率一般与气温正相关,温度越高,灌木林地的出现概率也就越大,土壤有机质与灌木林地的发生概率也较大,说明土壤有机质越高,灌木林地的出现概率也就越大。

### (5) 耕地

影响桐梓河流域耕地分布的 13 个驱动力因子分别为坡度、土壤有机质、离铁路站点的距离、离城镇中心的距离、高程 DEM、GDP 总量、离居民点的距离、离喀斯特岩性中心的距离、人口数量、降水量及气温。其中坡度、离铁路站点的距离、离城镇中心的距离、高程 DEM、GDP 总量、离居民点中心的距离、离喀斯特岩性中心的距离、降水量以及气温与耕地地类的相关系数  $\beta$  为负数,说明流域耕地地类的空间分布与这几个驱动因素显著负相关。从相关系数大小来说,流域气温、坡度和降水量与耕地地类的负相关系数相对比较大,分别为  $-0.154$ 、 $-0.047\ 137$  和  $-0.004\ 721$ ,说明在研究区内平均气温越高、降水量越大,耕地出现的概率也不一定越高,坡度与耕地负相关,说明坡度越大的地方越不适合于开垦耕地,而坡度较小的地方,耕地出现的概率越高。桐梓河流域土壤有机质与耕地的分布概率正相关,说明在喀斯特地区土壤有机质越高,耕地的出现概率也越高。

### (6) 草地

影响桐梓河流域草地分布的 9 个驱动力因子分别为坡度、土壤有机质、高程 DEM、灯光指数 DSMP、离居民点中心的距离、离喀斯特中心的距离、人口总量、降水量以及气温。其中坡度、土壤有机质、高程 DEM、灯光指数 DSMP、离居民点的距离、人口数量

以及气温与草地地类的相关系数  $\beta$  值为负数,说明流域草地的空间分布与这几个驱动因素显著负相关。从这些影响因子中可以看出坡度以及海拔对草地概率的分布明显负相关,说明在桐梓河流域地区草地的分布概率一般出现在海拔较低、坡度较缓的地区。从相关系数大小来说,气温和灯光指数 DSMP 与草地地类的负相关系数相对较大,分别为  $-0.208\ 697$  和  $-0.119\ 809$ ,说明在喀斯特地区气温越高,草地出现的概率越低,而研究区内灯光指数 DSMP 越小草地的分布概率越高,这也符合自然规律,流域的灯光指数是流域城镇发展空间的反映,草地也一般远离于城市建设用地分布。桐梓河流域中的降水量和离喀斯特岩性中心的距离与草地的分布概率显著正相关,说明在桐梓河的喀斯特地区草地

的分布与岩性有着极大的关系,草地一般在喀斯特地区出现的概率较高,而流域中的降水量也与草地的分布概率正相关,说明降水越多,流域的草地分布也就越高。

### 3.4 桐梓河流域土地利用模拟

根据计算得到的各种驱动力因子的  $\beta$  系数,可以得出各驱动因子在回归方程中的回归系数,将以上求出的回归系数代入 binary logistic 回归模型中,可以求出桐梓河流域 6 种土地利用类型的回归方程,借助于 ArcGIS10.2 中的栅格计算器可以求出桐梓河流域不同土地利用类型空间分布概率图,其中分布的概率值越大,表示出现此种土地利用类型格局的概率越大。以下为桐梓河流域 binary logistic 回归方程如下,模拟效果图如图 4 所示。

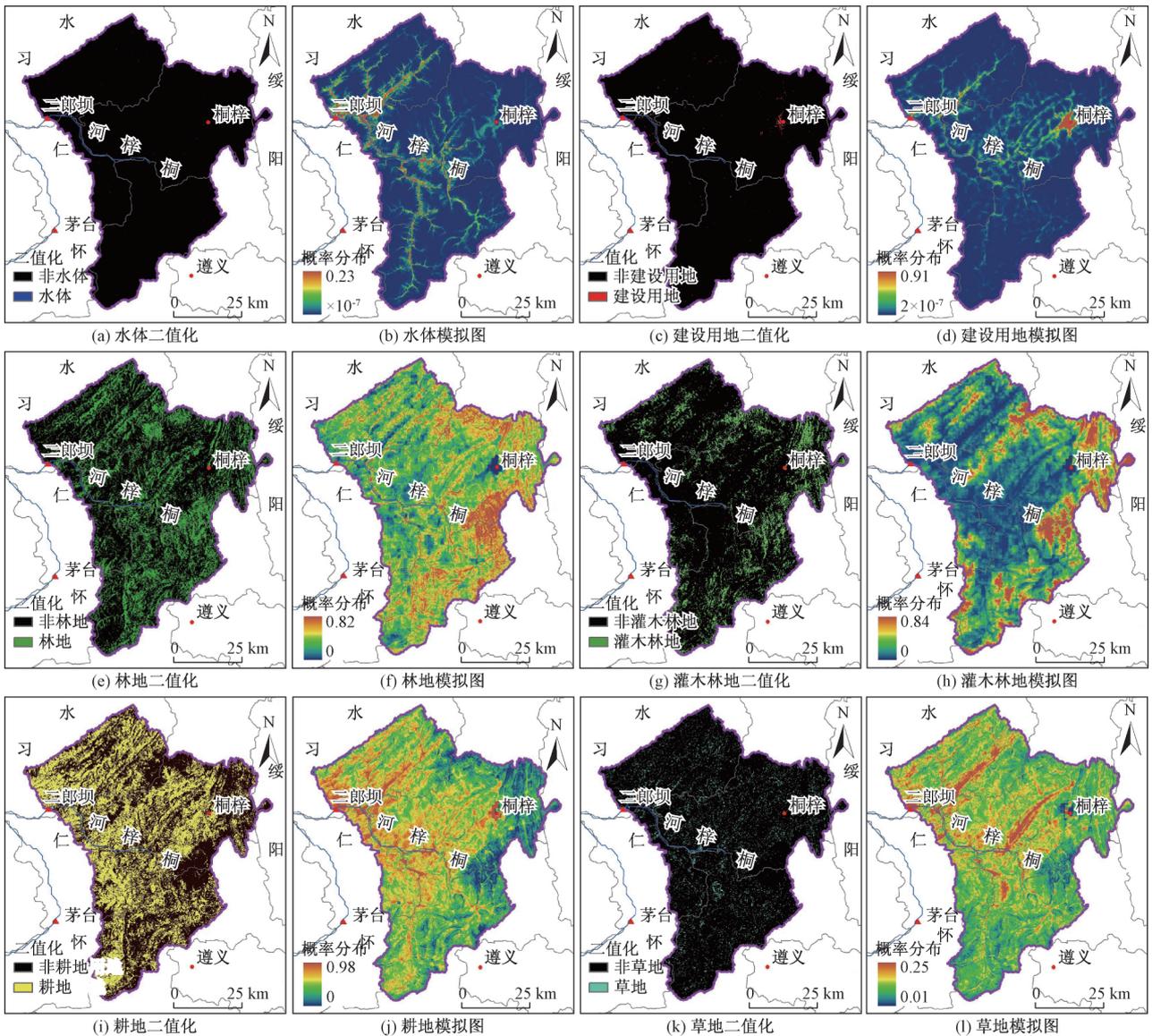


图 4 研究区各土地利用类型空间分布实际情况与概率

Fig. 4 The current situation and probability of the spatial distribution of various land use types in study area

(1) 水体:

$$\lg \frac{P_0}{1-P_0} = 1.778\ 317 - 0.096\ 191X_1 - 0.007\ 636X_4 + 0.000\ 472X_6 - 0.001\ 104X_7 + 0.000\ 833X_{10} \quad (4)$$

(2) 建设用地:

$$\lg \frac{P_0}{1-P_0} = -0.021\ 6 - 0.068\ 887X_0 - 0.115\ 305X_1 + 0.000\ 176X_2 - 0.003\ 738X_3 + 0.231\ 380X_4 - 0.000\ 76X_5 + 0.000\ 595X_6 - 0.001\ 671X_{10} + 0.000\ 197X_{11} + 0.000\ 174X_{13} \quad (5)$$

(3) 林地:

$$\lg \frac{P_0}{1-P_0} = -1.540\ 8 + 0.039\ 877X_0 - 0.010\ 196X_1 - 0.000\ 060X_2 - 0.067\ 545X_3 + 0.000\ 145X_5 - 0.001\ 526X_7 - 0.003\ 535X_8 - 0.000\ 138X_9 + 0.000\ 126X_{10} - 0.000\ 037X_{11} - 0.390\ 106X_{12} - 0.000\ 205X_{13} \quad (6)$$

(4) 灌木林地:

$$\lg \frac{P_0}{1-P_0} = -15.725\ 5 - 0.032\ 232X_0 - 0.020\ 42X_1 - 0.000\ 029X_2 - 0.003\ 944X_3 - 0.099\ 651X_4 - 0.000\ 118X_5 + 0.000\ 204X_6 - 0.002\ 679X_7 - 0.003\ 608X_8 - 0.000\ 107X_9 - 0.000\ 114X_{10} + 0.232\ 719X_{12} \quad (7)$$

(5) 耕地:

$$\lg \frac{P_0}{1-P_0} = 10.838\ 0 - 0.047\ 137X_0 - 0.020\ 017X_1 + 0.000\ 017X_2 - 0.001\ 544X_3 - 0.000\ 316X_5 - 0.000\ 196X_6 + 0.000\ 508X_7 - 0.004\ 721X_8 - 0.000\ 03X_{11} - 0.154X_{12} - 0.000\ 376X_{13} \quad (8)$$

(6) 草地:

$$\lg \frac{P_0}{1-P_0} = 1.071\ 8 - 0.025\ 029X_0 - 0.017\ 474X_1 - 0.000\ 639X_3 - 0.119\ 809X_4 - 0.000\ 146X_5 + 0.000\ 148X_6 - 0.000\ 086X_7 + 0.000\ 723X_8 - 0.208\ 697X_{12} \quad (9)$$

在对桐梓河流域不同土地利用进行 binary logistic 回归分析之后,获得的各种土地利用的概率图像与研究区实际的土地利用分布现状是否一致,需要运用相关方法对每一种土地利用类型进行一致性检验。目前,在对不同土地利用类型进行检验时,使用较多的方法是由 Ponitius 提出的 ROC 曲线检验方法。该检验方法对于预测的结果是否通过检验,是根据 ROC 曲线和对角线之间的面积的大小来度量的,一般来说,一个随机模型的 ROC 的值为 0.5,而

达到理想状态下 ROC 的值为 1。当 ROC 的值达到 1 时,说明拟效果最好,模拟的结果与真实的土地利用完全吻合,反之当 ROC 的值越接近 0,说明模拟的土地利用效果最差<sup>[19]</sup>。以下为桐梓河流域不同土地利用类型在 0.05 的置信水平下所得到的 ROC 曲线检验结果。

由图 5 可知,所选择的解释土地利用变化的驱动力因子能很好地模拟典型喀斯特地区的土地利用格局分布状况。其中水体和建设用地所选择的驱动力因子的模拟和解释能力最好,ROC 的值分别为 0.897 和 0.917,而灌木林地的解释能力较强,其值为 0.795;林地和耕地 ROC 的值在 0.7 附近,说明林地和耕地的驱动力因子对这两个地类的揭示能力较弱,草地 ROC 的值最小,仅为 0.587,但是不影响模型的正常运行。综上,桐梓河流域各种土地利用类型的 ROC 的值均高于 0.5,表明各地类的概率分布和真实的地类分布具有很好的模拟效果,回归方程能较好地解释地类的空间分布状况。为了进一步检验模型模拟的效果,采用栅格图像逐点对比方法确定模型的精度,使用 ArcGIS10.2 中的 create random point 命令随机采样 1000 个样点,每个样点包含了实际图层和模拟图层信息,通过逐点对比并计算发现,建设用地的模拟准确率最高(89.62%),水体次之(86.15%),而草地的模拟准确率最低,其值仅为 62.68%,这与喀斯特地区人地矛盾突出,受生计所迫人们不得不加大垦荒力度,导致草地斑块类型趋于离散化,回归变量对草地的解释能力稍弱有着直接的关系。

## 4 讨论

### 4.1 与其他方法结果对比及其原因分析

研究在对典型喀斯特流域土地利用的模拟尺度在进行选择时,通过设置 10 种不同的空间分辨率尺度,在二元逻辑斯蒂回归方程的支持下得出桐梓河流域的最佳模拟空间尺度为 120 m × 120 m,该值与王祺等<sup>[20]</sup>学者关于基于邻域相关的漓江流域土地利用多情景模拟与景观格局变化的研究结果相近,王祺等<sup>[20]</sup>基于 Auto-logistic 回归模型构建了基于情景的 CLUE-S 模型,在模型构建的过程中他认为漓江流域的土地利用模拟尺度为 150 m × 150 m;而研究结果与田义超等关于黄土台塬区的土地利用最佳模拟结果相比,其值显著低于台塬区的最佳模拟尺度,田义超等<sup>[21]</sup>认为黄土台塬区的土地利用的最佳模拟尺度为 400 m × 400 m,这种不同的尺度选择结果与不同研究区的地质地貌类型有着直接的关系。研究区的典型地貌类型与文献[20]研究区类似,同

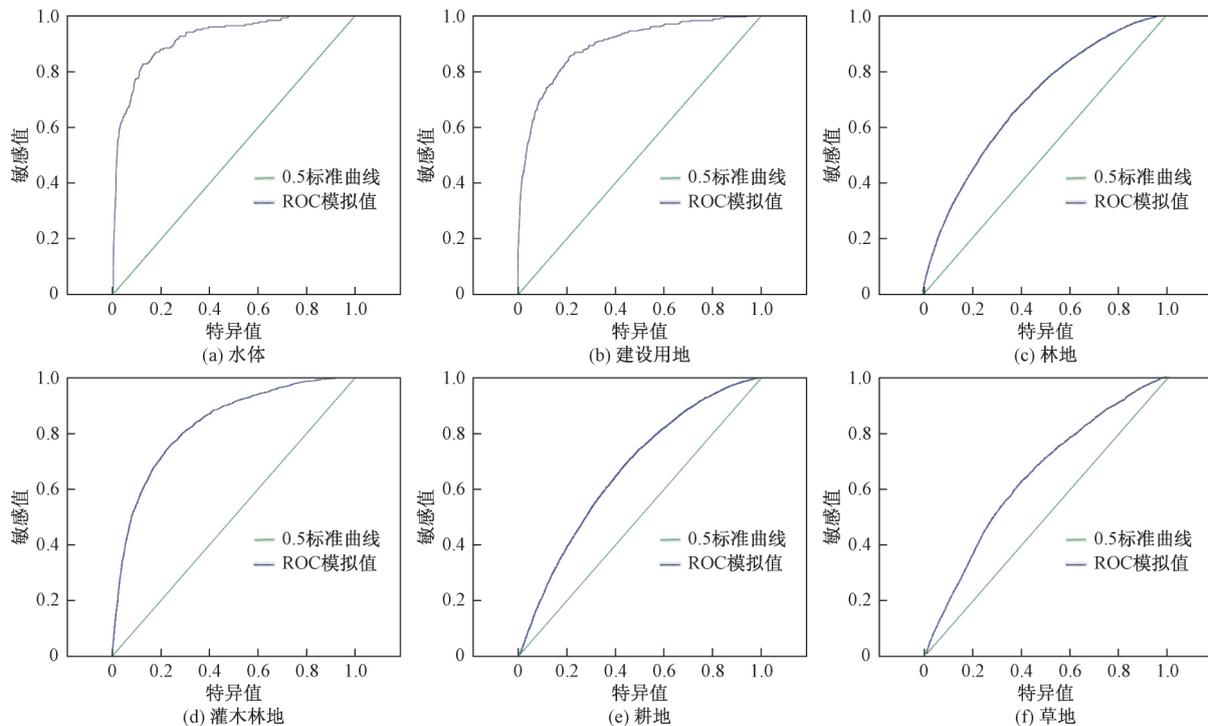


图5 研究区不同土地利用类型 ROC 模拟曲线

Fig. 5 ROC simulation curves of different land use types in the study area

为典型的喀斯特地区,这一地区因不合理的人为活动,加上本身地质条件脆弱,导致生态环境恶化而发生水土流失,出现了大面积的基岩裸露,裸露的基岩切割原有的景观格局,使其完整的景观格局出现破碎化特征,景观异质性特征极为明显,因此通过 logistic 回归方程所甄别出的土地利用模拟尺度极为相似,而文献[21]通过二元 logistic 回归模型所揭示的黄土台塬区空间尺度明显大于桐梓河流域的土地利用模拟尺度,这与黄土台塬区地貌类型有着直接的关系,黄土台塬是由黄土覆盖在河谷阶地台面上,沿河谷呈长条状分布的黄土台面,台面上景观格局一般比较单一,景观的斑块呈现出整体化分布趋势,因此其尺度效应较大。

#### 4.2 研究结果的重要发现及意义

基于二元 logistic 回归的空间模拟模型是筛选和识别土地利用变化驱动因素、揭示土地空间分布格局、预测土地变化概率的重要手段<sup>[20]</sup>。率先将二元逻辑斯蒂回归方程及影响土地利用变化的驱动力因子数据相结合,采用定量化的数理统计模型对影响典型喀斯特流域的土地利用模拟尺度进行了选择,在此基础上揭示了典型流域的土地利用关键性控制因子,该方法为国际同行进行喀斯特地区土地利用情景模拟和情景预测提供了最佳的模拟空间尺度,同时为国内外同行关于喀斯特地区土地利用变化的关键性控制因素的甄别提供了理论和数据支

撑,为拓展典型喀斯特流域土地利用和驱动力机制的定量化研究提供了一套技术流程与技术方法。重要结果发现主要分为两个部分,其一是揭示了典型喀斯特流域的土地利用最佳模拟尺度为  $120\text{ m} \times 120\text{ m}$ ,其二揭示了典型喀斯特流域土地利用变化的关键性驱动力因子,即喀斯特地区林地与灌木林地的出现概率并不是与降水量的大小有着直接的关系,这与非喀斯特地区有着显著的区别,非喀斯特地区如北方的黄土高原地区,该地区的植被由于长期受到缺水的作用,限制林地和灌木林地生长的关键要素是降水量,而通过研究结果可知,喀斯特地区林地和灌木林地的生长(或林地和灌木林地的出现概率)一般与气温正相关,温度越高,林地的出现概率也就越大。在喀斯特地区草地的分布与岩性有着极大的关系,草地一般出现在喀斯特地区以及降水量高的地区,而气温越高,草地出现的概率则越低,该项研究成果可为喀斯特地区植被恢复以及石漠化治理工程提供新的视角。

## 5 结论

以典型喀斯特流域 1980、1990、2000、2010、2015 年五期的遥感影像解译数据以及研究区的自然社会经济等数据为基础,综合土地利用转移概率矩阵以及 binary logistic 逻辑斯蒂回归模型对桐梓河流域的土地利用格局进行了最佳模拟尺度选择,在

此基础上构建了研究区不同地类空间分布概率以及二元 logistic 回归模型,得出以下结果。

(1) 桐梓河流域属于典型的喀斯特流域,流域的景观类型异质性较强,土地利用类型在研究期间内转移过程比较复杂,各种土地类型流转中“转出与转入”现象普遍存在。

(2) 草地面积主要由林地、灌木林地和耕地转换而来,主要流向林地和灌木林地;耕地主要由灌木林地和林地转换而来,主要流向草地、林地和建设用地;灌木林地则主要由林地转换而来,主要流向耕地。

(3) 通过对桐梓河流域 10 种不同尺度的转换效应甄别下,识别出  $120\text{ m} \times 120\text{ m}$  是桐流域土地利用分析及其模拟的最佳空间尺度。

(4) 不同驱动因子对各种地类空间分布格局的影响程度不同,喀斯特地区林地与灌木林地的出现概率与降水量的大小没有直接的关系,降水量越大的地方流域的林地分布概率也不一定越高;而林地和灌木林地的发生概率一般与气温正相关,温度越高,林地的出现概率也就越大。在喀斯特地区草地的分布与岩性有着极大的关系,草地一般出现在喀斯特地区以及降水量高的地区,而气温越高,草地出现的概率则越低。

(5) 从桐梓河流域可以看出,水体和建设用地的所选择的驱动力因子的模拟和解释能力最好,分别为 0.897 和 0.917,灌木林地的解释能力较强,其值为 0.795;而草地的值最小,仅为 0.587。从逐点对比的精度来看,建设用地的模拟准确率最高(89.62%),水体次之(86.15%),而草地的模拟准确率最低,其值仅为 62.68%。

#### 参 考 文 献

- 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展,2012,23(2): 278-285  
Dong Leihua, Xiong Lihua, Yu Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 278-285
- Li D, Huang Y, Qiao B, et al. The research on land-use change and ecological environment effect of urban landscape in China[J]. International Journal of Geosciences, 2016, 7(7): 956-961
- 保家有,王海华. 亦庄新城地区土地利用时空动态变化及其驱动因素分析[J]. 科学技术与工程,2008,8(6): 1522-1529  
Bao Jiayou, Wang Haihua. Land use temporal-spatial dynamic change and driving factor analysis of Yizhuang New City Area[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(6): 1522-1529
- Hunter M C. Emerging landscapes: Using ecological theory to guide urban planting design: An adaptation strategy for climate change[J]. Landscape Journal, 2011, 30(2): 173-193
- 吴莉,侯西勇,徐新良,等. 山东沿海地区土地利用和景观格局变化[J]. 农业工程学报,2013,29(5): 207-216  
Wu Li, Hou Xiyong, Xu Xinliang, et al. Land use and landscape pattern changes in coastal areas of Shandong Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 207-216
- Turner B L I, Skole D L, Sanderson S, et al. Land-use and land-cover change. Science/research plan[J]. Global Change Report, 1995, 43(1995): 669-679
- Bormann H, Breuer L, Gräff T, et al. Analysing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance: A comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis[J]. Ecological Modelling, 2007, 209: 29-40
- 蔺卿,罗格平,陈曦,等. LUCC 驱动力模型研究综述[J]. 地理科学进展,2005,24(5): 79-87  
Lin Qing, Luo Geping, Chen Xi, et al. Review of land-use model[J]. Progress in Geography, 2005, 24(5): 79-87
- 张永民,赵士洞. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用[J]. 自然资源学报,2003,18(3): 310-318  
Zhang Yongmin, Zhao Shidong. CLUE-S and its application for simulating temporal and spatial change of land use in Naiman Banner[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(3): 310-318
- Verburg P H, Schot P P, Dijst M J, et al. Land use change modeling: Current practice and research priorities[J]. Geojournal, 2004, 61(4): 309-324
- 王海军,孔祥冬,张勃. 空间统计模型在土地利用与覆被变化模拟与预测中的应用——以 Logistic-CA-Markov 模型为例[J]. 科学技术与工程,2016,16(15): 139-143  
Wang Haijun, Kong Xiangdong, Zhang Bo. Application of spatial statistical model in LUCC simulation and forecast—Taking the Logistic-CA-Markov model as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(15): 139-143
- 赵庚星,尚建业. 黄河三角洲垦利用土地利用的系统动力仿真模拟研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版,1998,24(2): 141-147  
Zhao Gengxing, Shang Jianye. Study on land use system dynamics simulation of Kenli County, Yellow river delta[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University: Agriculture and Life Sciences, 1998, 24(2): 141-147
- 赵何丹,金凤君,周璟. 基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化——以京津冀都市圈为例[J]. 地理科学,2011,31(8): 903-910  
Zhao Hedan, Jin Fengjun, Zhou Jing. The changes of land use and landscape pattern based on Logistic-CA-Markov model—A case study of Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(8): 903-910
- 赵李闻. 基于 CLUE-S 模型的土地利用模拟研究[D]. 南京: 南京师范大学,2011  
Zhao Liwen. Simulation of land use based on CLUE-S model[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011
- 田义超,任志远. 基于 CLUE-S 模型的黄土台塬区土地利用变化模拟——以陕西省咸阳台塬区为例[J]. 地理科学进展,2012,31(9): 1224-1234  
Tian Yichao, Ren Zhiyuan. Land use change simulations in loess hilly areas based on CLUE-S Model: A case study in Xianyang Loess Tableland areas of Shaanxi Province[J]. Progress in Geography,

- 2012, 31(9): 1224-1234
- 16 Manno A. CART: Classification and regression trees [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Data Mining & Knowledge Discovery, 2011, 1(1): 14-23
- 17 徐 岚, 赵 羿. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. 应用生态学报, 1993, 4(3): 272-277  
Xu Lan, Zhao Yi. Forecast of land use pattern change in Dongling District of Shenyang: An application of Markov process [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1993, 4(3): 272-277
- 18 邓 华, 邵景安, 王金亮, 等. 多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1979-1997  
Deng Hua, Shao Jing'an, Wang Jinliang, et al. Land use driving forces and its future scenario simulation in the Three Gorges Reservoir Area using CLUE-S model [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11): 1979-1997
- 19 闫效莺, 康 磊. 基于回归模型的网络排序算法预测药物靶点关系[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(22): 36-40  
Yan Xiaoying, Kang Lei. A regression-based network ranking prediction model for drug-target interaction [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(22): 36-40
- 20 王 祺, 蒙吉军, 毛熙彦. 基于邻域相关的漓江流域土地利用多情景模拟与景观格局变化[J]. 地理研究, 2014, 33(6): 1073-1084  
Wang Qi, Meng Jijun, Mao Xiyun. Scenario simulation and landscape pattern assessment of land use change based on neighborhood analysis and auto-logistic model: A case study of Lijiang river basin [J]. Geographical Research, 2014, 33(6): 1073-1084
- 21 田义超, 陈志坤, 梁铭忠, 等. 土地利用最佳模拟尺度选择及空间格局模拟[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(24): 244-249  
Tian Yichao, Chen Zhikun, Liang Mingzhong, et al. Selection of land use best simulation scale and patterns of spatial simulation [J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(24): 244-249

## Land Use Change and Its Simulation in Tongzi River Basin Based on Binary Logistic Model

TIAN Yi-chao<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Yuan-lin<sup>1\*</sup>, BAI Xiao-yong<sup>4</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, TAO Jin<sup>1</sup>,  
ZANG Ya-li<sup>1</sup>, XIE Xiao-kui<sup>1</sup>, WANG Ri-ming<sup>1</sup>

(College of Resources and Environment<sup>1</sup>, Key Laboratory of Marine Geographic Information Resources Development and Utilization<sup>2</sup>, Guangxi Key Laboratory of Beibu Gulf Marine Biodiversity Conservation<sup>3</sup>, Beibu Gulf University, Qinzhou 535000, China; State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences<sup>4</sup>, Guiyang 550081, China)

**[Abstract]** In order to explore the temporal and spatial change process of land use in typical karst basins and reveal the main controlling factors of land use change in the basins, the probability matrix of land use transfer and the binary logistic regression model was combined to select the optimal simulation scale for the land use pattern based on the remote sensing image interpretation data from 1980, 1990, 2000, 2010, 2015 and the natural and socio-economic data in the Tongzi river basin, and then a probability map of spatial distribution of different land types in the basin was constructed. The results show that the heterogeneity of landscape type in the basin is strong, and the transfer process of the land use type is complex during the study period. The phenomenon of “turning out and transferring” is common in the study area. The best spatial simulation scale for land use analysis and land use simulation is 120 m × 120 m in Tongzi river basin. The probability of the occurrence of woodland and shrub land in Karst is not directly related to amount of precipitation, and the probability of distribution of woodland and shrub land in watershed with higher precipitation is not necessarily higher. The occurrence probability of woodland and shrub land is generally positively correlated with temperature. The higher the temperature, the greater the probability of occurrence of woodland and shrub land. There is a great relationship between the distribution of grassland and the lithology in Karst. The grassland usually appears in the Karst region and the region with high precipitation, and the higher the temperature. From the raster of point by point, the accuracy of the construction land is the highest (89.62%) and the water body is in second (86.15%), while the simulation accuracy of the grassland is the lowest, and its value is only 62.68%. It is concluded that the binary logistic regression model has a good simulation ability when identifying the spatial and temporal data changes and driving forces of land use in the karst basin.

**[Key words]** land use binary logistic spatial simulation the typical karst Tongzi river basin